# Über die relative Helligkeit der Farben elektrisch glühender Gase bei Wechsel von Druck und Stromstärke.

---

Inaugural-Dissertation

zur

**Erlangung der Doktorwürde**

der

hohen philosophischen Fakultät der Universität Rostock

ACAD. LAND. BAT. BIBL.

vorgelegt

von

**ALFRED ZEHDEN**

aus **Stettin.**

---

**Rostock.**

Rats- und Universitäts-Buchdruckerei von Adlers Erben, G. m. b. H.

1909.

Referent: Herr Professor Dr. Matthießen.

In der vorliegenden Arbeit ist die Helligkeit einzelner Spektrallinien der Gase Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff, welche in einer Geißlerschen Röhre durch Hindurchleiten elektrischer Induktionsströme zum Leuchten gebracht wurden, zum Gegenstand der Untersuchung gemacht. Eine Reihe der Beobachtungen wurde gewonnen durch Veränderung des Druckes, unter welchem sich die Gase in der Röhre befanden, bei konstanter Stromintensität, eine zweite Reihe durch Veränderung des Stromes bei gleichbleibendem Drucke.

## I. Literatur.

Den Ausgangspunkt für die ersten Untersuchungen über die Helligkeit der Spektrallinien der Gase in Geißlerschen Röhren lieferte die Beobachtung, daß man in den Protuberanzen der Sonne und in einigen Nebelflecken häufig nicht alle Linien des Wasserstoffs wahrzunehmen vermag, sondern nur die Linie F.

Robert Thalén[1]) und ungefähr gleichzeitig Young[2]) glaubten die Erscheinungen durch die größere

[1]) Robert Thalén: Mémoire sur la détermination des longeurs d'onde des raies métalliques. Nova Acta Reg. Soc. Upsal. 3e série.

[2]) Young: Catologue des raies renversées dans le spectre solaire. Secchi, Le Soleil t. II, p. 60; t. VI, 1868.

Intensität der F-Linie erklären zu müssen und untersuchten, um die Annahme zu bestätigen, die relative Helligkeit der Spektrallinien des Wassertoffs. Die Zahlen, welche die Forscher für die Lichtintensität angeben, haben jedoch nur geringen Wert, da sie nach Schätzung durch Augenmaß und ohne Berücksichtigung des Druckes und der Stromstärke gegeben sind.

In einer Arbeit von Crookes[3]) auf diesem Gebiete ist ein Fortschritt insofern zu verzeichnen, als sich seine Beobachtungen über verschiedene Verdünnungen der mit H gefüllten Röhre erstreckten: aber auch er begnügte sich so wie seine Vorgänger und wie auch M. H. Fiévez[4]) damit, die Helligkeit nach Schätzung ohne Messung anzugeben. Letzterer schwächte die Lichtbüschel der Spektrallinien durch ein Diaphragma, bis er zuletzt nur noch die Linie F wahrzunehmen vermochte. Daraus glaubte er den Schluß ziehen zu dürfen, daß sie die hellste Linie und darum häufig allein zu sehen sei.

Die Richtigkeit dieser Anschauungen wurde allerdings von Lagarde bestritten[5]) in einer Arbeit, welche die Erweiterung und Ergänzung einer Abhandlung[6])

---

[3]) W. Crookes: Sur la viscosité des gaz très raréfiés. Ann. de Chim. et Phys. 5e série t. XXIV, p. 426, 1881.

[4]) M. H. Fiévez: Recherches sur l'intensitè . . . etc., ebenda t. XX, p. 179, 1880.

[5]) H. Lagarde: Recherches photométriques sur le spectre de l'Hydrogène. Ann. de Chim. et de Phys. Sixieme série IV, 248, 1885.

[6]) Ders.: C. R. 95, 1350, 1882, s. a. Wiedemanns Annalen Beiblätter 1883, 316: Messungen der photometrischen Helligkeit der Spektrallinien des Wasserstoffs.

aus dem Jahre 1882 darstellt. Er bediente sich als Erster für diese Untersuchungen eines Spektrophotometers; die elektrische Energie lieferte ihm, so wie seinen Vorgängern, das Induktorium. Er kam zu dem Resultate, daß bei konstantem Druck die Lichtintensitä schneller zunimmt, wie die Stromintensität, und daß bei konstantem Strome die Helligkeit mit abnehmendem Druck stark bis zu einem Maximum steigt, um dann sehr schnell wieder zu fallen. Die relativ stärkste Helligkeitszunahme zeigte hierbei die violette Linie $H\gamma$.

Bei seiner Arbeit ist jedoch die Bestimmung der Stromstärke nicht einwandsfrei, weil er den Induktionsstrom durch die Ausschläge eines gewöhnlichen Spiegelgalvanometers maß. Denn haben wir in dem sekundären Kreise des Induktors Wechselstrom, so würde man nur die Differenz des Öffnungs- und Schließungsstromes messen, falls dieselbe nicht gleich Null ist. Haben wir jedoch infolge der unipolaren Leitfähigkeit des untersuchten Gases intermittierenden Gleichstrom, so hätte ein Reduktionsfaktor $f < 1$ eingeführt werden müssen, der höchst wahrscheinlich nicht konstant ist, weil bei stärkerem Strome die Unterbrechungsgeschwindigkeit und damit die Kurvenform eine andere wird.

Ohne diese Versuche Lagardes zu kennen, suchte Nebel[7]) den Induktionsstrom dadurch zu berechnen, daß er mit Hilfe eines mit absolutem

[7]) B. Nebel: Über die in einer Plükkerschen Wasserstoff-Röhre frei werdende Energie und deren Einfluß auf die Intensität des Lichtes. Elektrotechnische Zeitschrift 6, 394, 1885.

Alkohol gefüllten Thermometers die Stromwärme und mit einem Funkenmikrometer die Spannung maß. Dann bestimmte er den Strom i durch das Verhältnis der Stromenergie E zu der Spannung lp. Doch beging er eine ähnliche Ungenauigkeit hiermit, wie der französische Forscher da die im Wechselstromkreise geleistete Arbeit

nämlich $E < lp.\ i$

$E = lp.\ i.\ F$

ist, wobei der „Arbeitsfaktor“ $F < 1$ und vor allem für die verschiedenen Belastungen verschieden ist. Auch er kam zu dem Resultate, daß die Lichtintensität schneller wächst wie der Strom; die Abhängigkeit vom Druck untersuchte er nicht.

Im Gegensatz hierzu maß Natterer[8]) nicht die Helligkeit als Funktion des Stromes, sondern nur des Druckes. Er dehnte seine Beobachtungen als Erster über eine große Zahl von Gasen und Dämpfen aus. Da er sich jedoch hauptsächlich mit der Bestimmung der Schlagweite und nur nebenbei mit der Lichtstärke beschäftigte, stellte er letztere nur bei Atmosphärendruck und bei 25 mm Hg. fest, und zwar durch Probieren, in wie großer Entfernung von der Röhre man gewöhnliche Schrift noch zu lesen vermag.

Den hochgespannten Gleichstrom zog zuerst Ångström[9]) für diese Messungen hinzu. Er unter-

[8]) K. Natterer: Durchgang der Elektrizität durch Gase. Wied. Ann. 38, 663, 1889.

[9]) Knut Ångström: Bolometrische Untersuchungen über die Stärke der Strahlung verdünnter Gase unter dem Einflusse elektrischer Entladungen. Wied. Ann. 48, 493, 1893. Abgekürzte Mitteilung aus Acta Reg. Soc. Upsaliensis, 1892.

suchte N, H und CO und verfuhr in der Weise, daß er mit einem Bolometer die gesamte Strahlung der Röhre maß und darauf dasselbe nach Zwischenschaltung einer Alaun-Platte wiederholte, um so die Lichtstrahlen von den Wärmestrahlen zu trennen. Die Resultate seiner Arbeit, soweit sie für unsere Zwecke in Betracht kommen, sind dahin zusammenzufassen:

Bei konstantem Druck und variabelem Strom wächst die Lichtintensität proportional dem Strome; bei konstantem Strom und abnehmendem Druck wächst die Helligkeit in der Weise, daß sie bei Linien mit kleinerer Wellenlänge schneller zunimmt, oder, wie er sich ausdrückt, daß der Schwerpunkt der Energie des Spektrums gegen die violette Seite verschoben wird.

Zur Orientierung wiederholte er diese Versuche auch mit einem kleinen Induktorium als Stromquelle und einem Spektroskop statt des Bolometers und gelangte zu ungefähr denselben Ergebnissen. Bei größeren Stromstärken traten allerdings bedeutende Abweichungen von dem Gesetze auf, die er durch eine permanente Änderung der Gase erklärte. Er war sich hierbei wohl bewußt, daß diese Versuche mit Induktionsstrom nur ungenau sind, da er den Strom mit demselben Galvanometer maß, wie vorher den Gleichstrom.

E. A. Simonsen[10]) kam unter Anwendung einer Holtzschen Influenzmaschine zu ungefähr denselben Gesetzen der Lichtintensität als Funktion des Stromes

[10]) E. A. Simonsen: Photometrische und elektrische Untersuchungen mit atmosphärischer Luft gefüllter Röhren. Inaug.-Diss. Kiel, 1892.

und des Druckes für Luft, wie sie Ångström für die von ihm untersuchten Gase gefunden hat; doch gilt von seiner Strommessung das über Lagarde Gesagte in ähnlicher Weise.

Ångströms Schüler E. S. Ferry[11]) setzte diese Untersuchungen unter Verwendung einer Hochspannungsbatterie und eines Spektrophotometers mit den Elementen H, N und Hg fort. Seine Resultate sind: Die Helligkeit bei konstantem Druck ist nahezu proportional dem Strom und bei konstantem Strom umgekehrt proportional dem Druck.

In einer weiteren Arbeit[12]) stellte er fest, daß ein Gas, wenn es sich in einem Gasgemisch in größerer Menge befindet, denselben Gesetzen gehorcht, in kleineren Mengen jedoch die Lichtstärke langsamer wie der Strom anwächst.

Kalähne[13]) bediente sich wie Ångström des Gleichstromes für seine Untersuchung der Dämpfe des Hg und Cd und wiederholte sie wie dieser mit einem kleinen Induktorium; in beiden Fällen gelangt er zu dem Resultate, daß bei dem Hg- und Cd-Dampf das Gesetz der Proportionalität zwischen Strom- und Licht-

---

[11]) E. S. Ferry: Über das Verhältnis der Spannungen des elektrischen Stromes und der Stärke der Strahlung der Spektra reiner Gase in Vakuumröhren. Phys. Rev. 7, 1, 1898.

[12]) E. S. Ferry: Eine photometrische Studie über die Spektra von Mischungen von Gasen bei tiefen Drucken. Phys. Rev., 1898, p. 296.

[13]) Alfred Kalähne: Über die Spektra einiger Elemente bei der stetigen Glimmentladung in Geißlerschen Röhren und die Abhängigkeit der Lichtstrahlung von Stromstärke und Druck. Wied. Ann. 65, 815, 1898.

intensität nicht besteht; mit zunehmendem Druck nimmt bei konstantem Strom die Helligkeit der Spektrallinien ab.

Schließlich ist noch eine Abhandlung von Parcival Lewis[14]) zu erwähnen, die während der experimentellen Versuche dieser Arbeit veröffentlicht wurde. Er untersuchte mit Induktionsstrom, soweit seine Untersuchungen hier in Betracht kommen, die Helligkeit des Wasserstoff-Spektrums in ihrer Abhängigkeit vom Druck und fand, daß dieselbe bei konstantem Strom mit abnehmendem Druck zuerst langsam, dann stark wächst; ferner stellte er sich Sauerstoff dar zwecks weiterer Mischung mit Wasserstoff und Quecksilberdampf, das Spektrum war jedoch derartig unrein, daß keine einzige O-Linie zu sehen war und eine Helligkeitsmessung daher unmöglich blieb.

Diese Zusammenstellung dürfte die gesamte Literatur über die Helligkeit der Spektrallinien von Gasen und Dämpfen als Funktion des Drucks und der Stromintensität enthalten.

## II. Apparate und Methoden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung, wie sich die Lichtintensität einzelner Spektrallinien bei den Gasen Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff ändert. Sie soll keinesweg allgemein

---

14) Parcival Lewis: Über den Einfluß kleinerer Beimengungen zu einem Gase und dessen Spektrum. Wied. Ann. 1899, Heft 10, S. 398.

zu entscheiden suchen zwischen den Resultaten der früheren Autoren, ob die Helligkeit z. B. schneller wie der Strom anwächst oder proportional; sie kann nur Antwort geben für eben die Bedingungen, unter welchen die Versuche angestellt wurden. Denn jeder, der sich bei derartigen Messungen verschiedener Röhren und Stromquellen bedient hat, weiß, wie außerordentlich die ganzen Lichterscheinungen von den Versuchsbedingungen abhängen und von einander verschieden sein können; die absolute und auch die relative Helligkeit der verschiedenen Spektrallinien wird bedeutend davon beeinflußt, ob man Induktionsstrom mit oder ohne Kondensator oder Wechselstrom von einer Wechselstrommaschine oder Gleichstrom von einer Hochspannungsbatterie benutzt, ob man eine Röhre mit oder ohne kapillaren Teil anwendet; sie ist abhängig auch von der Leitfähigkeit des Glases der Röhre, von der Form der Elektroden, von der angewandten Spannung, kurz von so vielen Umständen, daß man eigentlich nur die Versuche mit einander vergleichen darf, die unter genau gleichen Bedingungen gemacht sind.

Es wurde Induktionsstrom gewählt, weil, wie ausgeführt, die bisherigen Messungen nicht einwandsfrei sind. Die Geißlersche Röhre hatte einen besonders engen kapillaren Teil. Die Anwendung eines solchen kommt der Forderung Ångströms[9]) nach, den Einfluß der verschiedenen, also auch engen Durchmesser der Röhren mit in den Kreis der Untersuchungen zu ziehen, und gewährt für eine fehlerfreie Messung haupt-

sächlich folgende Vorteile: Die Ladung der Glaswand ist eine kleinere und daher auch die Störung durch dieselbe geringer, wie bei weiten Röhren[15]); ferner ist aus demselben Grunde auch die Konstanz der Spannung an den Elektroden eine größere[16]), vor allem wichtig für diese Arbeit ist aber der Vorzug, daß die Entladungen im Kapillar weniger häufig sind, als wie in weiten Röhren[17]), weil die zu ihrer Einleitung nötige Spannung bedeutend größer ist; dadurch wird jede einzelne Entladung intensiver und die Helligkeit beträchlich gesteigert. Außerdem ist in dem kapillaren Teil die Stromdichte eine verhältnismäßig sehr hohe, was wiederum die Lichtintensität um ein Vielfaches vermehrt. Doch darf man den Querschnitt nicht unter eine, von den Versuchsbedingungen abhängige Grenze verkleinern, weil der leuchtende Faden sonst zu dünn und der Widerstand der Röhre zu groß und der Strom deshalb zu sehr geschwächt wird. Durch Versuche mußte daher festgestellt werden, welcher Querschnitt eine maximale Helligkeit gewährte.

Die Erreichung größtmöglicher Helligkeit ist eine unerläßliche Bedingung für die Untersuchung des O-Spektrums bei verschiedenen Drucken und Strömen. Seine Linien sind derartig lichtschwach, daß sie durch

15) E. Wiedemann: Über das thermische und optische Verhalten der Gase unter dem Einfluß elektrischer Entladungen. Wied. Ann. 10, 202, 1880.

16) W. Hittorf: Über die Elektrizitätsleitung der Gase. Wied. Ann. 20, 705, 1883.

17) O. Lehmann: Über elektrische Entladungen in Gasen. Wied. Ann. 22, 305, 1884.

sehr kleine Verunreinigungen des Gases schon völlig unsichtbar werden können, wie Lewis in der zitierten Arbeit[14]) feststellte. Der Sauerstoff ist daher auch in dieser Richtung noch nicht untersucht worden. Angström[9]) versuchte es zwar, gab aber bald die Arbeit auf.

### A. Instrumente.

Das für die Versuche verwandte Induktorium ist für normal zehn Volt gebaut und hat einen Deprez-Unterbrecher. Der sekundäre Strom wurde durch Regulierung des primären variiert und hatte folgenden Verlauf: Vom Induktorium zur Geißlerschen Röhre, durch ein Thermoelement von Klemenčič[15]) zum Induktor zurück. Dieses Element beruht darauf, daß der Induktionsstrom unmittelbar an der Lötstelle zweier 0,09 mm dicker Eisen-Konstantan-Drähte vorbeifließt; durch die Erwärmung der Lötstelle wird eine EMK von 51 MV pro $1^0$ erregt. Da auf diese Weise der Induktionsstrom durch die von ihm erzeugte Wärme gemessen wurde, mußten die erhaltenen Werte radiziert werden, um bei den verschiedenen Messungen die relativen Stromstärken zu gewinnen.

Der so entstehende Thermostrom wurde durch ein empfindliches Spiegelgalvonometer mit zwei Spulenpaaren gemessen. Infolge des kleinen Durchmessers der Thermodrähte ist ihre Wärmekapazität so gering, daß der Galvanometerausschlag sein Maximum

[15]) Klemenčič: Beiträge zur Kenntnis der Absorption und Verzweigungen elektrischer Schwingungen in Drähten. Wied. Ann. 50, 456, 1893.

fast momentan erreicht. Mit Anwendung eines Clarkelementes wurde die Empfindlichkeit dahin bestimmt, daß ein Skalenteil einem Strome von 0,0711 Ampère entsprach. Doch sind in den Versuchen die Stromintensitäten durch die abgelesenen Skalenteile resp. durch die Wurzel dieser Werte angegeben, da es in der Arbeit nur auf die Gesetze des Anwachsens der Lichtintensität ankommt und für die graphische Darstellung die Konstanten, die für Messungen im absoluten oder technischen Maße einzuführen gewesen wären, doch fortfallen.

Für die Untersuchung der drei Gase wurde ein und dieselbe Röhre benutzt; sie war 18 cm lang, 8 cm betrug davon der kapillare Teil, dessen lichter Durchmesser 0,8 mm groß war. Dieser Querschnitt hatte sich als der günstigste ergeben. Die Elektroden waren Aluminium-Drähte, weil dieses Metall fast gar nicht zerstäubt und daher die Spannung an der Röhre dauernd konstant bleibt. Als Vergleichslampe wurde eine Hefner-Altenecksche Amylacetat-Lampe benutzt. Zwar ist die Zusammensetzung der Spektra beim thermischen und beim elektrischen Glühprozeß eine durchaus verschiedene, weil aber nicht die relative Helligkeit der Spektrallinien des zu untersuchenden Gases festgestellt werden sollte, sondern das Gesetz, nach welchem die Helligkeit der einzelnen Linien bei verschiedenen Drucken und Stromstärken sich ändert, ist die Größe der gewählten Lichteinheit für die Resultate der Messung gleichgiltig. Da nun das Licht der Hefnerschen Lampe ein kontinuierliches Spektrum

besitzt, war es durchführbar, die Intensität der betreffenden Wellenlänge ihres Spektrums zur Einheit zu machen.

Weil das Arbeitszimmer sehr geräumig war und eine einzelne Beobachtungsreihe nur ca. eine Stunde in Anspruch nahm, ist nicht wahrscheinlich, daß die Beschaffenheit der Luft, also ihre Reinheit und Feuchtigkeit, sich derartig in der Beobachtungszeit änderte, daß eine Störung der Konstanz des Spektrums zu befürchten wäre; es konnte eine derartige Wirkung nicht konstatiert werden.

Für die photometrischen Messungen mußte ein Spektrophotometer benutzt werden, welches das Licht möglichst ungeschwächt (wegen der geringen Intensität des O-Spektrums) passieren läßt, also nur soweit verringert, wie es die Reflexion unbedingt verlangt. Das nach den Angaben von Paalzow zu diesem Zwecke umgebaute Glansche Spektrophotometer sei im Folgenden kurz beschrieben:

Ein Stativ trägt ein Tischchen mit zwei gleichseitigen Prismen und drei Rohre, das eine hiervon ist ein Fernrohr und drehbar angebracht. Von den beiden Kollimatorrohren enthält das eine ein feststehendes und ein drehbares Nicolsches Prisma, um das einfallende Licht nach Belieben schwächen zu können. Hat das Licht der Vergleichslampe dieses Rohr passiert, so erleidet es an dem ersten gleichseitigen Prisma die Dispersion und wird von dem zweiten in das Fernrohr reflektiert. Durch das andere Rohr dagegen geht das

Licht der Geißlerschen Röhre direkt hindurch und wird von dem Prisma zerlegt und gebrochen, so daß es unmittelbar in das Fernrohr gelangt und man zwei übereinander stehende Spektra, von dem Vergleichslicht und der Röhre, bekommt. Da das Fernrohr drehbar angeordnet ist, kann man es auf einen beliebigen Teil des Spektrums einstellen und dann durch einen Augenspalt eine Linie bestimmter Wellenlänge aus beiden Spektren ausschneiden. Haben diese beiden übereinander stehenden Spektrallinien infolge Einstellung des Nicols gleiche Helligkeit, sind sie also zu einer Linie zusammengeflossen, so kann man den Drehungswinkel $\alpha$ des Nicols an einer Skala ablesen und dadurch die Intensität leicht bestimmen. Ist nämlich die Helligkeit des Lichtes der Vergleichslampe $I^1$ und ihre Intensität bei einer bestimmten Drehung des Nicols I, so ist nach dem Kosinus-Quadrat-Gesetz, da bei der Skala der Winkel $90^0$ der maximalen Helligkeit entspricht,

$$I = I^1 \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot \sin^2 \alpha,$$

wobei $\frac{\alpha\,1}{\alpha\,2}$ das Verhältnis der verschiedenen Schwächungen der beiden Lichtstrahlen, von der Röhre und der Lampe, infolge des Durchganges durch die verschiedenen Medien bildet. Da es hier jedoch nur auf relative Messungen ankommt, bleibt die Größe von $\frac{\alpha\,1}{\alpha\,2}$ außer Betracht. Die Lichtintensität der Geißlerschen Röhre ist also durch $\sin^2 \alpha$ bestimmt und durch das $10^3$- resp. $10^4$fache in den Tabellen angegeben.

Das Zimmer war während der Beobachtungen völlig verdunkelt. Die Hefner-Lampe wurde durch einen schwarz-lackierten Schornstein gegen Zugluft geschützt.

**B. Gewinnung des H-, O- und N-Spektrums.**

Der Wasserstoff wurde elektrolytisch gewonnen. Die negative Elektrode war ein Platindraht, während die positive durch ein amalgamiertes Zinkblech gebildet wurde, welches den dort entwickelten Sauerstoff absorbiert. Die Schwefelsäure war im Verhältnis 1 : 8 verdünnt. Von dem Entwickler gelangte der Wasserstoff durch eine mit konzentrierter Schwefelsäure gefüllte Trockenflasche zu der Geißlerschen Röhre.

Das Spektrum war außerordentlich rein und zeigte keine Spur von Sauerstoff. Untersucht wurde vom elementaren Linienspektrum, welches gewöhnlich einfach das H-Spektrum heißt, die rote Linie $H\alpha = 656{,}2$ (nach Ångström und H. W. Vogel), die grünlichblaue $H\beta = 486{,}1$ und die violette $H\gamma = 434{,}0$.

Der Sauerstoff wurde durch Erhitzen von Quecksilberoxyd gewonnen und durch ein enges, mit durchbohrten Glasperlen gefülltes Schlangenrohr geleitet, um die Quecksilberdämpfe abzufangen. Da es außerordentlich schwierig und zeitraubend gewesen wäre, aus den vorher mit Luft gefüllten Gefäßen das N-Spektrum durch abwechselndes Entwickeln und Auspumpen des Sauerstoffs zu entfernen, wurde das die Spektralröhre und das Entwickelungsgefäß verbindende Glasrohr mit einer Abzweigung zu einer Sauerstoff-

Bombe versehen. Von dieser aus wurde die ganze Kombination mehrfach bis zu Atmosphärendruck mit Sauerstoff gefüllt und dann unter Hindurchsenden eines möglichst starken Induktionsstromes durch die Röhre völlig ausgepumpt und dann der reine Sauerstoff eingeleitet. Auf diese Weise wurde ein reines O-Spektrum erlangt und auch erreicht, daß die sonst sehr störenden, durch Verbindung des Sauerstoffs mit dem Kohlenstoff des Fettes der Glashähne entstehenden Kohlenoxyd-Banden bald verschwanden, doch war das Spektrum trotz Anwendung des Kapillars und trotz Benutzung des Paalzowschen Spektrophotometers immer noch zu lichtschwach, um die Messungen über genügend große Grenzen der Stromstärke und des Druckes erstrecken zu können.

Deswegen wurde zu einem dritten Hilfsmittel in Erinnerung an eine von A. Paalzow und H. W. Vogel im Jahre 1881 gemachte Beobachtung[19]) gegriffen, indem eine Spur von Wasserstoff dem Sauerstoff zugeleitet wurde. Auf diese Weise gelang es, ein genügend helles Spektrum zu erreichen, ob jedoch diese minimale Beimengung gestattet ist, möge im Teil III, A, β, welcher die Beobachtungen über das O-Spektrum erhält, näher untersucht werden. Das Verbindungsrohr zu der Geißlerschen Röhre gabelte sich also bei den Messungen betreffs des Sauerstoffs in drei Teile, der eine führte zu dem Gefäß mit Quecksilberoxyd, der zweite zur

[19]) A. Paalzow und H. W. Vogel: Wied. Ann. 13, 337, 1881. Über das Sauerstoffspektrum.

Sauerstoffbombe und der dritte zu dem Wasserstoffentwickler. Von dem zusammengesetzten Linienspektrum wurden gemessen die rote Linie $\lambda = 615$, die grüne $\lambda = 532$ und die violette $\lambda = 436$.

Der Stickstoff wurde aus der Luft gewonnen; das dauernd zwischen Pumpe und Geißlersche Röhre eingeschaltete Trockengefäß fing die Wasserdämpfe ab, während mittels Ätzkali die Kohlensäure und mit Phosphor der Sauerstoff entfernt wurde. Es wurden gemessen die rote Linie $\lambda = 622{,}6$ und die grüne $\lambda = 516{,}6$.

### C. Gang der Versuche.

Während der ganzen Dauer der Versuche blieb die Geißlersche Röhre an der zur Messung der kleinen Drucke mit einem Mac Leodschen Manometer[20]) versehenen Quecksilber-Luftpumpe angeschlossen. Jedes der drei Gase wurde nach zwei Richtungen untersucht. Das eine Mal wurde die Abhängigkeit der Lichtintensität vom Druck bestimmt, während der Strom durch Regulierung des Primärstromes konstant erhalten wurde, d. h. da es sich hier um Wechselstrom handelt, bei konstantem quadratischen Mittelwert der Stromintensität. Es war bei jeder Messung der Drehungswinkel des Nicols, der Druck am Manometer und der Ausschlag am Galvanometer abzulesen. Zweitens wurde bei konstantem Druck die Lichtintensität als Funktion des Stromes beobachtet. Hier waren also Drehungswinkel und Galvanometer zu vermerken.

[20]) Mac Leod: Philos. Mag. 48, 110, 1884.

Jede dieser Beobachtungsreihen wurde mindestens dreimal wiederholt und innerhalb jeder Reihe das Photometer zum wenigsten zweimal, bei den violetten Linien mindestens dreimal bei jeder Messung eingestellt.

## III. Beobachtungen.

Im Folgenden bedeutet p den in mm Hg gemessenen Druck; i die in Skalenteilen angegebene Stromstärke; I die Lichtintensität, gemessen durch ein Vielfaches von $\sin^2\alpha$, $\alpha$ den Drehungswinkel des Nicols in Graden; die Buchstaben r, g und b in den Figuren unterscheiden die roten grünen und blauen Linien von einander.

### A. Die Lichtintensität als Funktion des Druckes bei konstantem Strom.

α) Wasserstoff.

In der folgenden Tabelle sei eine ganze Versuchsreihe wiedergegeben, während die weiteren Tabellen auf die resultierenden Daten beschränkt bleiben mögen.

**Tabelle I.**

| Versuch Nr. | p in mm Hg | α λ=656,2 =r | 486,1 =g | 434,0 =b | sin α r | g | b | $F=\sin^2\alpha \cdot 10^3$ r | g | b |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 25,5 | — | 5 | 11,5 | — | 0,087 | 0,199 | — | 7,60 | 39.6 |
| 2 | 19,5 | 3,7 | 7,7 | 13,7 | 0.0646 | 134 | 228 | 4,17 | 18,1 | 52 |
| 3 | 16 | 3,7 | 7,8 | 14 | 0646 | 135 | 242 | 4,17 | 18,2 | 58,6 |
| 4 | 13 | 4,4 | 8,1 | 15,3 | 0767 | 141 | 260 | 5,88 | 19,9 | 67,6 |
| 5 | 9 | 4,5 | 8,3 | 16,3 | 0785 | 144 | 281 | 6.16 | 20,7 | 79 |
| 6 | 6,5 | 5,7 | 11,5 | 19,5 | 0993 | 199 | 328 | 9,86 | 39,6 | 107,5 |
| 7 | 4 | 8,9 | 19 | 24,5 | 155 | 326 | 415 | 24,0 | 106,3 | 172,2 |
| 8 | 2,2 | 10,2 | 26 | 32 | 177 | 438 | 530 | 31,3 | 191,8 | 280,9 |
| 9 | 1,76 | 13.5 | 27 | 27 | 233 | 454 | 454 | 54.3 | 206,1 | 206,1 |
| 10 | 0,83 | 12 | 25 | 25 | 208 | 423 | 423 | 43,3 | 178,9 | 178,9 |
| 11 | 0,31 | 8,18 | 19,6 | 19 | 140 | 335 | 309 | 19,6 | 112,2 | 95,5 |

Die Ergebnisse sind durch Figur I graphisch dargestellt und lassen sich dahin aussprechen:

Bei abnehmendem Druck steigt die Lichtintensität der untersuchten Wasserstofflinien zuerst langsam, dann stärker und stärker bis zu einem Maximum, um dann sehr schnell wieder zu fallen. Die Helligkeit des grünen Teiles des Spektrums steigt und fällt schneller wie die des roten, die Helligkeit des blauen Teiles schneller wie die des grünen; der Schwerpunkt der spektralen Energie wandert also bei abnehmendem Druck zum violetten Teil hin und kehrt nach Unterschreitung des Druckes von 1,8 mm (unter unseren Versuchsbedingungen) wieder um.

Das violette Licht steigt also bedeutend schneller an, wie das rote und grüne; daß die Zahlenwerte, welche die Helligkeit angeben, auch bedeutend höher sind, wie die der anderen, darf aber nicht zu der Ansicht führen, als ob nun $H\gamma$ wirklich die hellste der drei Linien ist, tatsächlich ist sie vielmehr die dunkelste. Denn, wie noch einmal hervorgehoben werden möge, sind die Zahlenangaben für die Lichtintensität I bezogen auf die Helligkeit der Hefner Lampe für die betreffenden Wellenlängen, und da deren Spektrum im violetten Teil recht lichtschwach ist, kommen für $H\gamma$ hohe Werte heraus.

### β) Sauerstoff.

Daß die Hinzuleitung einer ganz geringen Menge Wasserstoff die Resultate in der Messung des O-Spektrums nicht meßbar beeinflußt, läßt sich aus folgenden drei Gründen rechtfertigen resp. beweisen.

Erstens ist es von vornherein nicht annehmbar, daß eine minimale Spur eines fremden Gases die Ergebnisse stören wird, zumal man ja ein absolut reines Spektrum niemals erlangen kann; sehr geringe Beimengungen von fremden chemischen Elementen, ferner Staub und Metallteilchen, die durch den Strom von den Elektroden abgerissen sind, werden sich bei den Spektralröhren niemals völlig fern halten lassen.

Zweitens fand Ferry[12]), wie schon erwähnt, daß für die Gase in Gasgemischen dieselben Gesetze gelten, wie im reinen Zustande; die relativen Werte, also eine graphische Darstellung der Lichtveränderung werden daher durch Beimischung fremder Gase nicht beeinflußt. Dieser Satz wird durch eine Arbeit[21]) von Waltenhofen, die schon aus dem Jahre 1865 datiert, gestützt. Er fand, daß bei hochverdünnten Gasgemischen die Abnahme der Intensität und das schließliche Verlöschen der verschiedenen Spektren bei weiterem Evakuieren nur von dem Mischungsverhältnis der Gase abhängt; die relative Helligkeit bei den verschiedenen Drucken und damit auch das Gesetz der Helligkeitsänderung bleibt also dasselbe.

Einen direkten Beweis drittens, daß die Zuführung des Wasserstoffs nicht die Quelle von fehlerhaften Resultaten ist, erlangt man, wenn man ein von Ebert für die von ihm in anderer Hinsicht untersuchten Gase

---

[21]) A. von Waltenhofen: Einige Beobachtungen über das elektrische Licht in hochverdünnten Gasen. Pogg. Ann. 126, 527, 1865.

aufgefundenes Gesetz[22]), betreffend den „Umkehrdruck", auch auf den Sauerstoff anwendet und durch die Beobachtungen bestätigt findet.

Es existiert nämlich für jedes Gas ein bestimmter Druck, unter welchem es bei bestimmter Elektrodenspannung am meisten Strom hindurchläßt, also den geringsten Widerstand besitzt, falls man bei einem gasförmigen Leiter von einem solchen sprechen darf. Ebert stellte nun fest, daß dieser Umkehrdruck U der mittleren Weglänge $\lambda$ der Gasmoleküle proportional ist, daß also die Gleichung besteht

$$U = c\lambda$$

wobei c von der Konstruktion der Röhre ahhängt und um so größer ist, je kleiner ihr Durchmesser. Nun entspricht der größten Stromstärke auch die größte Lichtintensität, wie die sämtlichen Arbeiten der zitierten Literatur bezeugen. Da nun der Umkehrdruck der Lichtintensität bei unseren Versuchen mit Wasserstoff (siehe Fig. I) 1,8 mm Hg beträgt und die mittlere Weglänge der Moleküle dieses Gases unter Atmosphärendruck $\lambda_H = 185\ \mu\mu$ ist, wird für unsere Röhre

$$c = \frac{U}{\lambda_H} = 0{,}00973.$$

Ist also das Änderungsgesetz des O-Spektrums durch die Anwesenheit des H nicht beeinflußt, so muß hier der Umkehrdruck werden, da $\lambda_O = 95\ \mu\mu$

$$U_O = 0{,}92 \text{ mm Hg}.$$

[22]) Hermann Ebert: Die in Entladungsröhren umgesetzten Werte an elektrischer Wechselstromenergie. Wied. Ann. 67, 608, 1899.

Nach anderen Angaben[23]) ist $\lambda_H \cdot 172{,}4$ woraus sich berechnet $U_O = 0{,}99$.

Wie nun die folgende Tabelle und Figur II bei Aufzeichnung auf Millimeterpapier ergeben, liegt $U_O$ tatsächlich in der Mitte zwischen diesen beiden Werten, nämlich bei 0,95 mm Hg, wobei die Fehlergrenze 0,02 mm beträgt.

**Tabelle II.**

| p in mm Hg | $I = \sin^2\alpha \cdot 10^4$ | | |
|---|---|---|---|
| | r | g | b |
| 12,5 | — | 4,1 | 20 |
| 9,2 | 2,1 | 9,6 | 50,1 |
| 6,5 | 7,9 | 15,3 | 80,2 |
| 4,1 | 15 | 22,1 | 107,5 |
| 1,05 | 20.0 | 31 | 180 |
| 0,32 | 17 | 21 | 82,3 |
| 0,12 | 2 | 2,05 | 24,1 |

Die Kurven der Figur II lassen sich dahin deuten: Die Intensität der O-Linien steigt bis zu einem Maximum auf der roten Seite des Spektrums umgekehrt proportional dem Druck, auf der violetten Seite stärker, um nach Unterschreiten des günstigsten Druckes schnell wieder abzufallen. Die Lichtintensität des brechbareren Teiles wächst also schneller, wie die des weniger brechbaren, in Übereinstimmung mit den Ergebnissen bei

[23]) Adolph Wüllner: Lehrbuch der Experimentalphysik S. 535.

der Untersuchung des Wasserstoffes, und fällt dann auch wieder schneller; d. h. für den Umkehrdruck U wird, als eine weitere Schlußfolgerung aus dieser und Angströms Arbeit, das Verhältnis $\eta_l$ zwischen der Lichtenergie N und der gesamten ausgestrahlten Energie E das günstigste, ein Umstand, der Beachtung verdient bei der Ausführung des schon mehrfach ausgesprochenen Gedankens einer praktischen Beleuchtung mit dem Luminiscenz-Licht. Es ist also

$$\eta_u = \frac{N}{E} = \eta_l \max.$$

### γ) Stickstoff.

Das vom Wasserstoff Gesagte läßt sich auch auf das N-Spektrum anwenden, wie Tabelle und Figur III beweisen:

**Tabelle III.**

| p in mm Hg | $I = \sin^2\alpha \cdot 10^3$ | |
|---|---|---|
| | r | g |
| 25,5 | — | 7 |
| 18,5 | 6,8 | 20 |
| 14 | 10,1 | 35 |
| 9 | 22,2 | 65 |
| 4 | 56,3 | 235 |
| 1,5 | 97 | 335 |
| 0,35 | 76 | 225 |

Auch an den Kurven des Stickstoffs ersieht man, daß der Umkehrdruck für die Stromstärke mit dem

für die Helligkeit identisch ist. Denn nach der Ebertschen Formel berechnet sich, da

$$\lambda_N = 88{,}6 \text{ ist}$$

$$U_N = 0{,}86 \text{ resp. } U_N = 0{,}92$$

während der in den Messungen sich ergebende Wert

$$U_N = 0{,}90$$

beträgt.

## B. Die Lichtintensität als Funktion der Stromstärke bei konstantem Druck.

Die frühere Ansicht, daß in dem stromdurchflossenen Gase der Geißlerschen Röhren eine außerordentlich hohe Temperatur herrsche, wurde durch E. Wiedemanns exakte Untersuchungen[24]) vollständig widerlegt. Er fand, daß Gase nicht wie bei den festen Körpern einer hohen Temperatur bedürfen, um Licht auszustrahlen, sondern daß sie in den Spektralröhren unter gewöhnlichen Umständen schon bei 100° und darunter leuchtend werden.

Daher ist die Druckdifferenz in der Röhre, wenn sie stromlos und wenn sie stromdurchflossen ist, nur eine geringe. Dadurch daß das Kapillarrohr mit der verhältnismäßig sehr voluminösen Luftpumpe dauernd

[24]) E. Wiedemann: Wied. Ann. 5, 500, 1876. Untersuchungen über die Natur der Spektra; ders. 6, 298, 1879. Über das Leuchten der Gase durch elektr. Entladungen; ders. 10, 202, 1880. Über das thermische und optische Verhalten von Gasen unter dem Einfluß elekr. Entladungen; vergl. a. E. Warburg: Über Wärmeleitung nnd Temperatur der in Geißlerschen Röhren leuchtenden Gase. Wied. Ann. 54, 265, 1895 u. a.

in Verbindung blieb, war dieser Druckunterschied so minimal, daß er nicht gemessen werden konnte, obgleich das Mac-Leodsche Manometer noch gut die Ablesung von 1/1000 mm Hg gestattete. Der Druck hielt sich also bei den verschieden starken Strömen konstant und brauchte daher nicht nachreguliert zu werden. Jedes der Gase wurde bei den folgenden Messungen bis zu seinem Umkehrdruck verdünnt.

### α) Wasserstoff.

**Tabelle IV** (siehe Figur IV).

| i | $I = \sin^2\alpha \cdot 10^3$ | | |
|---|---|---|---|
| | r | g | b |
| 2 | 8 | 20 | 25 |
| 5 | 25 | 75 | 90 |
| 7,5 | 40 | 115 | 135 |
| 10,2 | 55 | 170 | 205 |
| 12 | 65 | 205 | 250 |
| 15 | 82,5 | 265 | 312 |

### β) Sauerstoff.

**Tabelle V** (siehe Figur V).

| i | $I = \sin^2\alpha \cdot 10^4$ | | |
|---|---|---|---|
| | r | g | b |
| 3,2 | 4,5 | 5,1 | 24 |
| 6,3 | 9,4 | 10,2 | 46,1 |
| 9,5 | 14,3 | 15,7 | 68,2 |
| 12,4 | 18,1 | 20,6 | 84,3 |
| 14,8 | 22 | 24 | 104 |
| 17 | 25,9 | 28,4 | 119,7 |

γ) Stickstoff.

**Tabelle VI** (siehe Figur VI).

| i | $I = \sin^2\alpha \cdot 10^3$ | |
|---|---|---|
| | r | g |
| 2,8 | 17 | 63 |
| 5,1 | 30,3 | 109 |
| 8,3 | 50 | 172 |
| 12,4 | 77 | 261 |
| 15,2 | 96 | 315 |
| 19,8 | 121 | 410 |

Gemeinsame Resultate: Die Helligkeit der untersuchten Spektrallinien der drei Gase ändert sich proportional der Stromstärke und zwar in der Weise, daß die Seite der kürzeren Wellenlängen bei zunehmendem Strom schneller anwächst.

Während jedoch beim Wasserstoff die Intensität der grünen Linie fast ebenso schnell ansteigt, wie die der violetten und während auch beim Stickstoff die Helligkeit der grünen Linie weit schneller steigt, wie die der roten, wächst beim Sauerstoff die Lichtstärke der grünen nur um ein Geringes schneller an, als die der roten und bedeutend langsamer als die der blauen. Das langsame Ansteigen der Lichtintensität erstreckt sich also beim Sauerstoff über einen größeren Teil des Spektrums, als beim Wasserstoff und Stickstoff.

Nicht unerwähnt bleiben möge die Erscheinung, daß bei dauerndem weiteren Verstärken des Stromes die Helligkeit der Linien der drei Gase zwar etwa in dem zu erwartenden Maße zunahm, das Galvanometer jedoch in seinen Ausschlägen Unregelmäßigkeiten

zeigte, eine Beobachtung, die auch Ångström schon gemacht hat[9]). Ging er auf schwächere Ströme wieder zurück, so bekam er nicht dieselben Ausschläge wieder, woraus er auf eine permanente Veränderung der Gase schloß.

Bei den vorliegenden Versuchen ging jedoch der Ausschlag bei abnehmender Stromstärke auf ungefähr denselben Skalenteil zurück, wie bei ansteigender; ferner war die Nadel bei den starken Stromintensitäten äußerst unruhig, der reflektierte Lichtstrahl flog mit ziemlicher Regelmäßigkeit schließlich über die ganze Skala hin und her, so daß ein Ablesen unmöglich wurde.

Die Erscheinung dürfte in einer, wenn auch äußerst kleinen Zerstäubung der Aluminium-Elektroden bei den größeren Stromstärken ihren Grund haben. Durch dieses Zerstäuben sinkt der Übergangswiderstand zwischen Metall und Gas außerordentlich, da ein Verdampfen der Elektroden die Leitungsfähigkeit Geißlerscher Röhren sehr stark vermehrt[25]), es geht also ein starker Strom hindurch. Durch das Sinken des Übergangswiderstandes sinkt auch die Erwärmung der Elektroden, da die Joulesche Wärme im Metall bei der immerhin sehr geringen Stromintensität nicht in Betracht kommt. Infolge der Abnahme der Erwärmung

[25]) O. Lehmann: Über elektrische Entladungen in Gasen. Wied. Ann. 22, 305, 1884. F. Stenger: Beiträge zur Elektrizitätsleitung der Gase. Wied. Ann. 25, 31, 1885. A. Schuster: Versuche über die Entladung der Elektrizität durch Gase. Wied. Ann. Beibl. 1887, 847 u. a.

der Elektroden hört die Verdampfung auf, der Übergangswiderstand bildet sich wieder und das Spiel beginnt von Neuem; so ließe sich auch das Hin- und Herpendeln des Spiegels bei den starken Strömen erklären.

Vielfach nimmt man zwar an, daß Aluminium-Elektroden gar nicht verdampfen[26]); unter Anwendung einer Wechselstrommaschine und einer besonders konstruierten Röhre, durch die ein Strom von einem Ampère hindurch geschickt wurde, konnte jedoch eine Zerstäubung mit Sicherheit konstatiert werden. Ein weiteres Eingehen auf diese Messungen würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten.

## IV. Zusammenstellung der Resultate.

Durch die Messungen unter den angegebenen Versuchsbedingungen sind bei den Gasen H, O und N folgende Tatsachen festgestellt:

1. Die Lichtintensität der Spektrallinien des Sauerstoffs verändert sich beim konstanten Strom ungefähr umgekehrt proportional dem Druck, der violette Teil des Spektrums etwas schneller.

2. Die Lichtintensität der Spektrallinien des Sauerstoffs verändert sich bei konstantem Druck proportional der Stromstärke.

3. Die Lichtintensität der Spektrallinien des Wasserstoffs und Stickstoffs wächst bei konstantem Strom

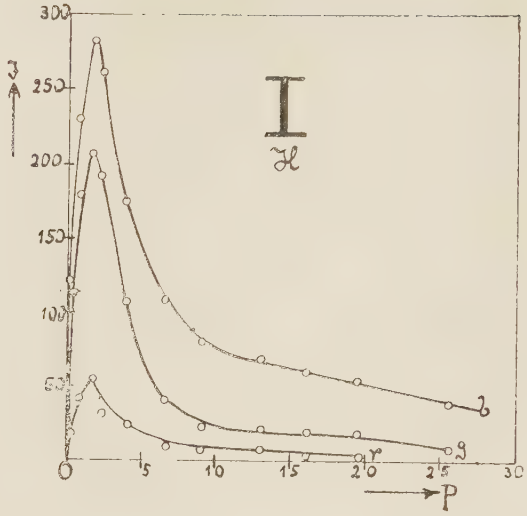
[26]) O. Lehmann: Die elektrischen Lichterscheinungen oder Entladungen, Seite 187, Halle a. S., 1898.

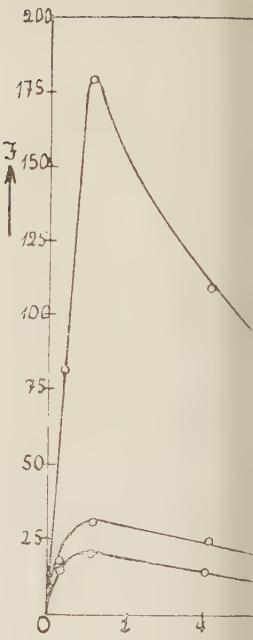
und abnehmendem Druck (Maximalwert 25 mm Hg) zuerst langsam, darauf stark und fällt nach der Erreichung des Maximums sehr stark.

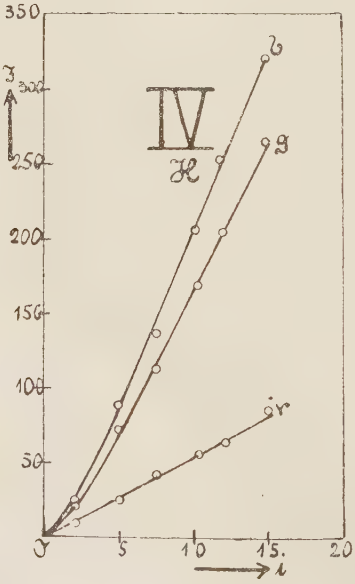
4. Die Lichtintensität des Wasserstoffs und Stickstoffs wächst bei konstantem Druck proportional dem Strom, in Übereinstimmung mit den unter Anwendung von Gleichstrom gemachten Versuchen[9] [11]) im Gegensatz mit den Ergebnissen der Arbeiten von Lagarde[1]) und Nebel[7]).

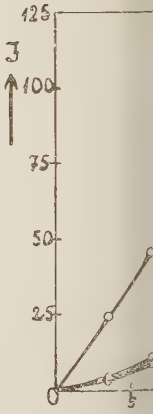
5. Bei den Messungen 1—4 verhält sich der grüne Teil des Spektrums beim Sauerstoff ähnlich wie der rote, beim Wasserstoff und Stickstoff ähnlich wie der blaue; bei allen drei Gasen wächst die Intensität des blauen stets stärker wie die des roten.

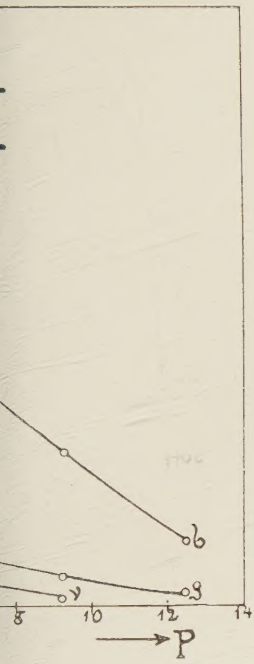
6. Die Drucke der maximalen Lichtintensität der untersuchten Gase verhalten sich wie ihre mittleren Weglängen und sind identisch mit den „Umkehrdrucken“ (Ebert[22]) der Stromstärke und Spannung an der Röhre. .

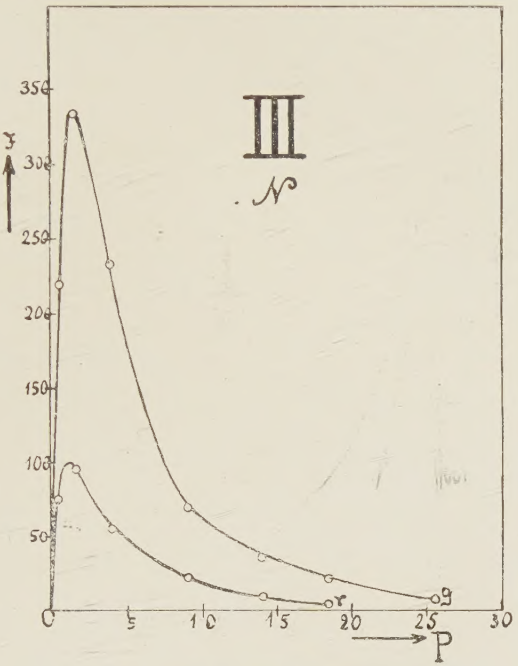

I
J
300
250
200
150
100
50
0
5
10
15
20
25
30
P
b
g
r

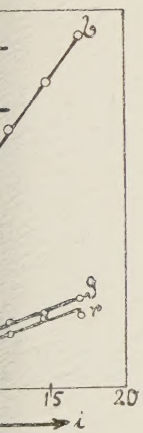

J
200
175
150
125
100
75
50
25
0
1
4

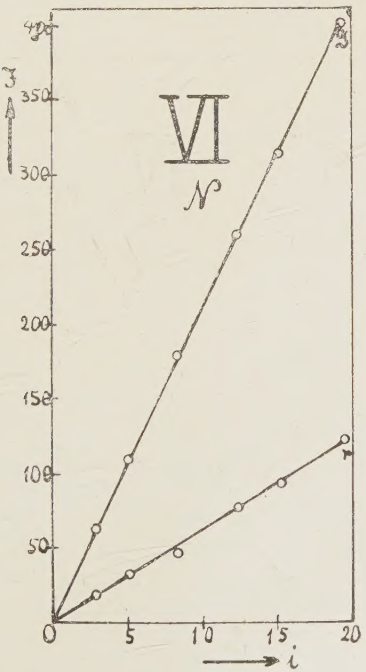

IV
J
350
300
250
200
150
100
50
0
5
10
15
20
i
b
g
r


J
125
100
75
50
25
0
5


b
v
g
8
10
12
14
P


III
N°
y
350
300
250
200
150
100
50
0
5
10
15
20
25
30
P
g
r


b
g
r
15
20
i


VI
N°
y
400
350
300
250
200
150
100
50
0
5
10
15
20
i
g
r

Die Arbeit wurde angefertigt im Physikalischen Institut der Königlichen Technischen Hochschule zu Charlottenburg. Ich möchte nicht versäumen, auch an dieser Stelle in dankbarer Erinnerung hervorzuheben, daß der inzwischen verstorbene Herr Geheimrat Professor Dr. A. Paalzow die Arbeit angeregt und durch sein freundliches Entgegenkommen und dauerndes Interesse gefördert hat.

# Lebenslauf.

Ich bin am 15. November 1876 zu Stettin geboren als Sohn des Kaufmannes Max Zehden und seiner Ehefrau Regina, geb. Badt. Nach Absolvierung des dortigen Marienstifts-Gymnasiums studierte ich auf den Technischen Hochschulen zu Hannover und Charlottenburg Elektrotechnik und allgemeinen Maschinenbau, war sieben Jahre lang als Ingenieur tätig und bezog im Oktober 1907 die Universität Rostock zwecks weiteren Studiums und Ablegung des Doktorexamens vor der philosophischen Fakultät.